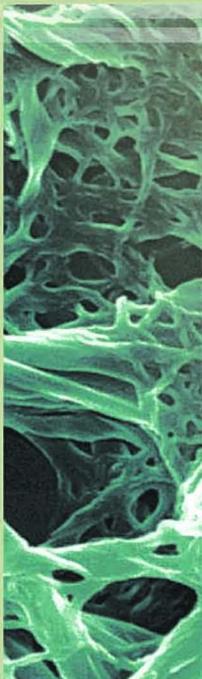




ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

**АКТИВИРОВАННЫМИ
МЕТОДАМИ
ИНЖЕНЕРИИ
ПОВЕРХНОСТИ**



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Объединенный институт машиностроения

ПОВЫШЕНИЕ
РЕСУРСА
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

**АКТИВИРОВАННЫМИ
МЕТОДАМИ
ИНЖЕНЕРИИ
ПОВЕРХНОСТИ**



Минск
«Беларуская навука»
2012

УДК 621.793+621.894

Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 452 с. – ISBN 978-985-08-1473-9.

В монографии обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку технологий повышения долговечности элементов трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности. Рассмотрены методы повышения износостойкости поверхностей трения, основанные на применении активированных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев газопламенным напылением, электрохимическим осаждением, фрикционным плакированием и трибомеханической обработкой. Изложены научно-технологические основы активирования процесса газопламенного напыления покрытий спутными газовыми потоками и наложением акустических колебаний. Раскрыт механизм активирующего влияния наноразмерных алмазно-графитовых добавок на процессы структурообразования покрытий и поверхностных слоев. Изложены практические рекомендации по использованию полученных результатов для повышения ресурса узлов трения мобильных машин и технологического обслуживания.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов.

Табл. 50. Ил. 202. Библиогр.: 482 назв.

А в т о р ы:

П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич

П о д о б щ е й р е д а к ц и е й

академика НАН Беларуси П. А. Витязя

Р е ц е н з е н т ы:

член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор А. В. Белый,
доктор технических наук, профессор О. Г. Девойно

ISBN 978-985-08-1473-9

© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технологические процессы инженерии поверхности относятся к числу эффективных средств улучшения физико-механических и триботехнических свойств элементов узлов трения мобильных машин и технологического оборудования. Методы инженерии поверхности включают в себя как нанесение на рабочую поверхность покрытий из другого материала (газотермическое напыление, электрохимическое осаждение, фрикционное плакирование, лазерная наплавка и др.) [1–5], так и реконструкцию поверхности (изменение ее структурно-фазового состояния) без нанесения дополнительных покрытий, к числу которых можно отнести микродуговое оксидирование, трибомеханическую обработку, ионную имплантацию и др. [4–8].

Важнейшей предпосылкой эффективного применения методов поверхностной инженерии является их активирование, обеспечивающее интенсификацию процесса обработки, модифицирование структуры формирующихся слоев, повышение эффективности процесса обработки и т. п. В качестве активирующих факторов при реализации процессов поверхностной инженерии могут выступать различные приемы повышения кинетической энергии распыляющей струи или изменения условий диспергирования распыляемого материала, а также методы изменения характера структурообразования формируемых покрытий или поверхностных слоев, в частности введением в состав технологических сред наноразмерных компонентов.

Физической основой модифицирования покрытий и поверхностных слоев наноразмерными добавками являются их потенциальные возможности образовывать ионные и координацион-

ные шивки, ограничивающие подвижность молекулярных цепей или их сегментов, проявлять когезионные и адгезионные взаимодействия и др. Нанодисперсные наполнители, введенные в электролит для электрохимического осаждения покрытий, позволяют значительно улучшить эксплуатационные свойства гальванопокрытий. Наночастицы, соосаждаясь с ионами металла на поверхность подложки, выступают в роли дополнительных центров кристаллизации, что обеспечивает получение покрытий с мелкодисперсной структурой и высокими физико-механическими и триботехническими характеристиками. Наноразмерные алмазно-графитовые добавки при фрикционном плакировании гибким инструментом способствуют формированию наноструктурированных покрытий, отличающихся повышенным уровнем антифрикционных и противоизносных свойств. Применение углеродных наночастиц в электролитах для микроплазменной обработки интенсифицирует скорость кристаллизации продуктов микродугового воздействия на оксидируемую поверхность, существенно сокращая продолжительность микроплазменной обработки изделий при одновременном обеспечении повышенных физико-механических и триботехнических свойств оксидокерамических покрытий. Наночастицы, введенные в состав смазочной среды, оказывают комплексное воздействие на трибосистему в процессе контактного взаимодействия, увеличивая ее долговечность за счет формирования разделительных слоев повышенной несущей способности, обеспечения стабильности реологических характеристик смазочного слоя в расширенном температурном диапазоне, а также модифицирования поверхностных слоев элементов пары трения путем уменьшения шероховатости поверхности и ее упрочнения.

В ряду модифицирующих добавок, включающем наноразмерные частицы металлов, оксидов, карбидов, боридов и др., наибольшее практическое применение для модифицирования покрытий и поверхностных слоев получили углеродные наноматериалы (углеродные нанотрубки, фуллерены, ультрадисперсные алмазно-графитовые частицы детонационного синтеза). Применение ультрадисперсных алмазно-графитовых частиц детонаци-

онного синтеза для получения нанокompозитов антифрикционного назначения является чрезвычайно перспективным в силу как минимум двух обстоятельств. Во-первых, наноразмерные алмазно-графитовые частицы сочетают в себе сверхвысокую твердость их алмазного ядра и высокие антифрикционные свойства слоистой графитосодержащей оболочки с повышенной поверхностной активностью и структурообразующими качествами ультрадисперсной среды. Во-вторых, детонационный синтез алмазно-графитовой шихты является в настоящее время практически единственным примером технологии получения наночастиц в промышленных объемах, что создает благоприятные предпосылки для разработки экономически оправданных технологий формирования покрытий и поверхностных слоев антифрикционного назначения с использованием алмазно-графитовых наноразмерных модифицирующих добавок (АНМД).

В первой главе изложены принципы активирования процессов поверхностной инженерии, базирующиеся на повышении газодинамических параметров распылительной струи спутными потоками и диспергировании распыляемого материала наложением акустических колебаний на расплавляемую проволоку при газотермическом напылении, на интенсификации электрохимических процессов посредством введения наноразмерной углеродной дисперсной фазы в состав электролита при электрохимическом осаждении покрытий, на интенсификации процессов пластической деформации поверхностных слоев путем введения в состав приработочной смазочной композиции наноразмерных сверхтвердых добавок при трибомеханической обработке поверхности.

Во второй главе даются основные положения методологии научно обоснованного выбора рационального метода и режимов восстановления, упрочнения и защиты детали, базирующегося на ее рассмотрении как элемента динамической системы, рассчитываемого на надежность. Представлены технологические аспекты формирования газопламенных покрытий из порошковых и проволочных материалов на деталях трибосопряжений. Приведены результаты исследований влияния модифицирую-

щего воздействия микроплазменной обработки, ионно-лучевого азотирования, карбонитрирования на физико-механические свойства газопламенных покрытий. Описаны методы и оборудование для активированного газопламенного напыления покрытий из полимерных порошков.

Третья глава посвящена результатам исследования влияния наноразмерных алмазно-графитовых модифицирующих добавок на структурно-фазовое состояние и свойства электрохимических и газотермических покрытий. Выявлены механизмы кристаллизации материала при гальваническом осаждении композиционного покрытия из электролита с наноразмерной дисперсной фазой в виде алмазно-графитовых частиц детонационного синтеза с различной степенью очистки. На основе компьютерной обработки экспериментальных данных установлены оптимальные технологические режимы осаждения композиционных покрытий из электролитов хромирования с наноразмерной алмазно-графитовой дисперсной фазой. Приведены примеры реализации процесса электрохимического осаждения хромалмазных покрытий для повышения ресурса металлообрабатывающего инструмента и элементов трибосопряжений мобильных машин и технологического оборудования различного функционального назначения. Описан разработанный метод модифицирования стальных газотермических покрытий посредством их импрегнирования наноразмерными углеродными добавками и последующей термомодеформационной обработки. Раскрыт механизм модифицирующего действия углеродных добавок на примере газотермических покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов. Даются технологические рекомендации по повышению свойств стальных газотермических покрытий их модифицированием наноразмерными углеродными добавками.

В четвертой главе изложены особенности влияния наноразмерных алмазно-графитовых частиц на процессы формирования структуры и свойств поверхностных слоев в процессе фрикционного плакирования и трибомеханической обработки. Отмечена положительная роль наноразмерных углеродных до-

бавок в формировании требуемого уровня триботехнических свойств модифицированных слоев, наносимых фрикционным плакированием, и показано их эффективное применение на примере формирования шумопоглощающих покрытий на рабочих поверхностях зубчатых пар и нанесения антифрикционных слоев на направляющие металлообрабатывающего оборудования. Изложены особенности трибомеханической обработки металлических материалов, металлопластмассовых композитов и газотермических покрытий в процессе их приработки в присутствии смазки с наноразмерными алмазосодержащими добавками. Приведены данные по оптимальным режимам приработки трибосопряжений в присутствии модифицированной смазки и показаны примеры повышения работоспособности узлов трения машин трибомеханической обработкой.

В монографии отражены результаты исследовательских работ, проведенных авторами в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, в том числе в сотрудничестве с доктором физико-математических наук В. А. Кукареко, научным сотрудником А. В. Ивахником и инженером Р. Г. Штемплюком.

Авторы признательны рецензентам члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору А. В. Белому и доктору технических наук, профессору О. Г. Девойно за ценные замечания и конструктивное обсуждение материалов рукописи.

МЕТОДЫ АКТИВИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

1.1. Активирование процесса газопламенного нанесения покрытий спутными газовыми потоками

1.1.1. Физическая и математическая модели процесса активирования спутным потоком

Сравнивая энергетическую эффективность и технические показатели различных технологий восстановления деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля (детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов), учитывая стоимость материалов, используемых при нанесении покрытий, было установлено, что достаточно эффективным и экономичным методом является газопламенное напыление (ГПН) порошковых и проволоочных материалов [1–12].

Особенно эффективен метод ГПН при восстановлении деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля, т. е. там, где не требуется наносить слои из керамики, жаропрочных композитов, а реставрации подлежат детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов.

Производимые отечественные и зарубежные термораспылители и напыляемые материалы, опубликованные методические рекомендации дали возможность решать ряд вопросов, связанных с увеличением срока службы деталей узлов трения, лезвийного почвообрабатывающего инструмента, корпусных деталей и т. д. Однако увеличение номенклатуры восстанавливаемых или упрочняемых деталей и повышающиеся требования к свойствам наносимых покрытий вызывают необходимость расширения области применения и возможностей ГПН, разработки новых способов и устройств, активирующих процесс напыления и по-

вышающих качество покрытий. Простота, легкость реализации и низкая удельная стоимость ГПН (4,5–6,5 долл/кг без стоимости наносимого материала) способствовали его широкому внедрению, однако диапазон использования без применения каких-либо активирующих приемов или технологий упрочнения остается крайне узким.

В последние годы важнейшей задачей в области исследования процессов и явлений, протекающих при напылении, явилось изыскание новых приемов (или их совокупности) активации, позволивших совершить качественный скачок в свойствах покрытий и диапазоне наносимых материалов. Однако обеспечиваемый применением активированного напыления эффект не всегда адекватен тем затратам, за счет которых он достигнут. Так, для увеличения адгезии порошковых покрытий с 25 до 50 МПа в США и странах Западной Европы используют высокоскоростные системы, вызывающие пяти-, восьмикратное увеличение удельной себестоимости процесса [13–20].

Уровень экономики и технического развития промышленно-го производства Беларуси и стран СНГ накладывает достаточно жесткие ограничения на возможности использования дорогостоящих материалов для покрытий, реализации разрабатываемых приемов активации процесса ГПН и последующего упрочнения. Целесообразность их использования должна прежде всего отвечать требованиям отечественных предприятий, а затраты на освоение соответствовать решаемым проблемам. Значит, речь может идти только о разработке рациональных методов активирования и соответствующих технических средств, реализующих эти методы.

Как показал проведенный анализ [21, 22], использование при газотермическом напылении спутных потоков, истекающих в двухфазную струю, позволяет существенно повысить скорость частиц при их контакте с основой без значительного повышения себестоимости процесса.

Количественная оценка влияния спутного потока на параметры двухфазной струи была получена еще в 70-х годах прошлого века с помощью интегральных методов Г. Н. Абрамовичем с сотр. [23].

Интегральные методы, однако, имеют существенный недостаток: для их реализации необходим большой объем экспериментальной информации, подтверждающей допущение о подобии всех параметров в поперечных сечениях, о границах начального и основного участков и т. д., что очень сильно ограничивает область применения данных методов.

Развитие вычислительной техники дало возможность при математическом моделировании неравновесных двухфазных течений использовать систему дифференциальных уравнений в частных производных, являющихся, по существу, уравнениями сохранения массы, импульсов и энергии для газовой компоненты струи и для частиц конденсированной фазы, записанных с учетом обмена импульсами и теплом между газом и частицами [24]. В отличие от интегрального данный подход позволил вычислять параметры двухфазного потока с произвольными начальными данными и при протекании в нем разнообразных физико-химических реакций. Это обусловило его широкое применение при численном решении задач газотермического напыления с использованием затопленных струй [24].

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что метод компьютерного моделирования двухфазных спутных потоков даст возможность рассчитать такие их параметры, при которых достигаются требуемые характеристики взаимодействующих с поверхностью частиц. Это позволит выбрать оптимальные параметры струй, обеспечивающие наилучшее газотермическое покрытие с наименьшими энерго- и ресурсозатратами.

В известных физических моделях процессов газотермического напыления рассматривается истечение двухфазной (факел – частицы) струи в затопленное пространство [24, 25]. При этом для методов газопламенного напыления формирование факела представляется как процесс сжигания газов с образованием ламинарного или турбулентного потока, движущегося по законам затопленной струи (так называемый свободный факел) [26]. Схема модели представлена на рис. 1.1, *a*. Единственной особенностью этого факела является газодинамический эффект, проявляющийся при диффузионном горении, когда скорость потока в факеле уменьшается слабее, чем в негорящей струе [27].

В работах Г. Н. Абрамовича [23] и В. Р. Кузнецова [26] для оценки влияния спутного потока рассмотрена «двухслойная модель», т. е. когда спутный поток возникает при движении источника, генерирующего факел. Наиболее характерным случаем «двухслойной модели» является факел движущегося в воздушном пространстве турбореактивного или ракетного двигателя. При этом отмечалось, что существенно большее воздействие на факел может быть оказано только в случае наличия спутного потока от независимого источника.

Интересующий нас случай с независимым источником спутного потока может быть представлен «трехслойной моделью» (рис. 1.1, б), описывающей движение двухфазной струи в искусственно созданном спутном потоке, который истекает в затопленное пространство. Анализ этой модели показывает, что для оценки дополнительного воздействия от спутного потока, в который истекает двухфазная струя, необходимо прежде всего учитывать его конечный радиальный размер и угол, под которым осуществляется взаимодействие с двухфазной струей.

Необходимо отметить, что сложность физической «трехслойной модели» из-за наличия указанных начальных условий обуславливает невозможность использования простейших алгебраических приемов, обычно применяемых к описанию процесса истечения струй в затопленное пространство.

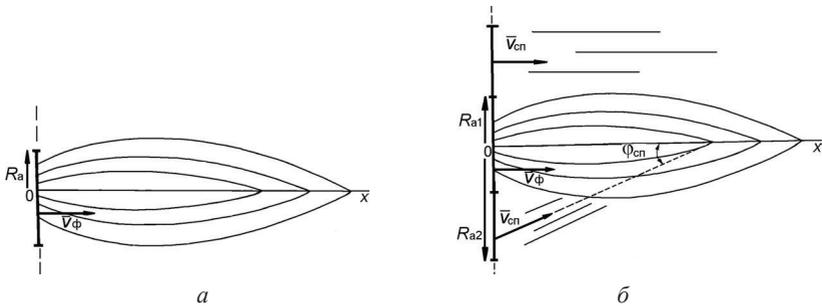


Рис. 1.1. Схема свободного факела (а) (при $x = 0$: $0 \leq r_i \leq R_a$, $V_i = V_\phi$) и факела, истекающего в спутный поток (б) (при $x = 0$: $0 \leq r_i \leq R_a$, $V_i = V_\phi$; $R_{a1} < r_i < R_{a2}$, $V_i = V_{сн}$; $R_{a2} < r_i < \infty$, $V_i = 0$)

Начальные условия, согласно этой модели (рис. 1.1, б), имеют вид

$$\begin{aligned} 0 \leq r_i \leq R_{a1}; V_i &= V_{\phi}, \\ R_{a1} < r_i < R_{a2}; V_i &= V_{\text{сп}}, \\ R_{a2} < r_i < \infty; V_i &= 0. \end{aligned}$$

Общий случай, когда струи 1 и 2 действуют под некоторым углом друг к другу, представлен на рис. 1.2. Для нахождения направления и скорости слившихся струй необходимо на векторах их количеств движения $m_2 v_2$ и $m_1 v_1$ построить параллелограмм. Его диагональ R_D определит направление слившихся струй.

Величина равнодействующей равна $R_D = m_1 V \cos \varphi_1 + m_2 V_2 \cos \varphi_2$. Средняя скорость потока по расходу определится как:

$$V_Q = \frac{m_1 V_1 \cos \varphi_1 + m_2 V_2 \cos \varphi_2}{m_1 + m_2}. \quad (1.1)$$

В частном случае, когда струи параллельны, следует, что $V_Q = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2}{m_1 + m_2}$.

Однако при параллельном движении струй с различными динамическими характеристиками (скоростями) по закону Бернулли возможно появление эффекта эжектирования [28] – приведение в движение или отклонение от первоначального направления движения газа под действием разрежения, создаваемого

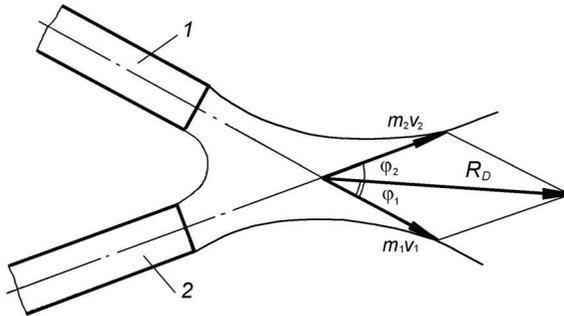


Рис. 1.2. Схема взаимодействия струй под углом друг к другу

другим газом, движущимся с большой скоростью (рис. 1.3). Высоконапорный газ, создающий разрежение, является эжектирующим (активным), а приводимый в движение – эжектируемым (пассивным).

Очевидно, что применительно к газопламенному напылению эффект эжектирования, появляющийся при взаимодействии струй, имеет смысл рассматривать только в том случае, когда спутный поток расположен внутри кольцевого факела пламени. В противном случае наружный параллельный спутный поток с высокими динамическими характеристиками будет отрицательно влиять на теплообмен между факелом и частицами, движущимися вдоль его продольной оси.

При моделировании двухфазных струй, использующем систему дифференциальных уравнений, широко применяются два подхода. К первому относятся модели, основывающиеся на «эйлеровом» описании для обеих фаз – это модели двухжидкостной сплошной среды [29], в которой реальное течение смеси частиц и газа заменяется взаимопроникающим течением двух сплошных сред – собственно газа и «газа частиц». При втором подходе общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе описаны с помощью эйлерова представления, а для описания движения и теплообмена с газом частиц конденсированной фазы с учетом обратного влияния частиц на газ применяется лагранжев подход [30]. Данный подход позволяет рассматривать более сложные случаи двухфазных течений. В силу простоты чисто эйлеров подход предпочтительно использовать, когда необходимо определить термодинамические параметры двухфазных сред, а их более детальные характеристики (спектр турбулентных пульсаций, распределение по скоростям и температурам частиц одного размера и т. д.) не представляют интереса.

Трудности решения полной системы уравнений, описывающей течение вязкого теплопроводного сжимаемого газа, обусловлены

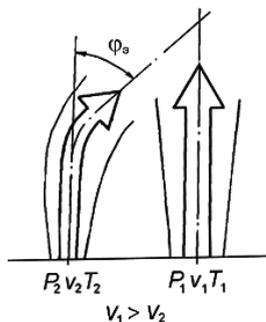


Рис. 1.3. Схема движения струй при эжектировании

не только нелинейным характером уравнений, но также и необходимостью задавать граничные условия во всей области, при этом положение конечного сечения, как правило, оказывается весьма неопределенным. Поскольку интересующие нас стационарные дозвуковые изобарические струи имеют вытянутую форму, то отношение поперечной компоненты скорости к продольной и отношение продольного градиента к поперечному меньше единицы, что позволяет вместо уравнений Навье–Стокса воспользоваться приближением пограничного слоя [31]. Переход от уравнений Навье–Стокса к уравнениям пограничного слоя означает переход от краевой задачи к задаче Коши с начальными данными и, следовательно, возможностью применять при расчетах маршевый метод с использованием начальных данных и условий на границе струи.

При использовании для описания течения двухфазной среды модели двухжидкостной сплошной среды [29] полагается, что газовая фаза определяется массовыми концентрациями газовых компонент Y_i ($i = 1, \dots, N_g$), давлением P , плотностью ρ , скоростью \vec{V} и температурой \vec{T} . Весовая доля частиц конденсированной фазы в струе составляет G_p . Реальное непрерывное распределение частиц конденсированной фазы по размерам заменяется разбиением на N_p групп. Частицы, принадлежащие одной группе, являются шарами одинакового радиуса R_k ($i = 1, \dots, N_p$). Каждая группа (k) характеризуется относительной весовой долей g_k , средней плотностью ρ_k (масса k -й компоненты в единице объема), скоростью \vec{V}_k , температурой T_k , долей конденсированной фазы, находящейся в твердом состоянии ξ_k . Давление создается только газовой фазой. Объем, занимаемый частицами, пренебрежимо мал. Будем рассматривать течения, в которых столкновения, коагуляция, дробление и испарение частиц конденсированной фазы отсутствуют.

В рамках принятых допущений ламинарное течение стационарной осесимметричной двухфазной изобарической струи в приближении пограничного слоя в цилиндрической системе координат с продольной координатой x и поперечной r описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ur) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho Vr) = 0, \quad (1.2)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho V \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + V_k \frac{\partial u_k}{\partial r} \right), \quad (1.3)$$

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho V \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu}{Pr} \frac{\partial H}{\partial r} + r \mu (1 - Pr^{-1}) \frac{\partial}{\partial r} \frac{u^2 + V^2}{2} \right] - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + V_k \frac{\partial H_k}{\partial r} \right), \quad (1.4)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho V \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \mu}{Sm} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + F_i(p, T, Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_s}), \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_k u_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_k V_k r) = 0, \quad (1.6)$$

$$u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + V_k \frac{\partial u_k}{\partial r} = f_{kx}, \quad (1.7)$$

$$u_k \frac{\partial V_k}{\partial x} + V_k \frac{\partial V_k}{\partial r} = f_{kr}, \quad (1.8)$$

$$u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + V_k \frac{\partial H_k}{\partial r} = q_k + u_k f_{kx} + V_k f_{kr}, \quad (1.9)$$

$$P = R \rho T \sum_i Y_i / W_i. \quad (1.10)$$

Уравнения (1.2)–(1.4) – это уравнения сохранения массы (уравнения неразрывности), импульса (уравнения движения в осевом направлении) и энергии для газовой составляющей струи, записанные с учетом членов, описывающих взаимодействие газа с частицами конденсированной фазы, а уравнения (1.6)–(1.9) – соответствующие уравнения сохранения для частиц конденсированной фазы с учетом членов взаимодействия с газом. В уравнениях (1.3), (1.4) взаимодействие газа с частицами проявляется в наличии членов, содержащих параметры частиц. В уравнениях для частиц (1.7)–(1.9) это взаимодействие записывается с помощью скорости обмена импульсом \vec{f}_k и теплом q_i между газом и ча-

стицами k -й группы. Изменение мольных концентраций газовых компонент в процессе химических реакций описывается уравнением (1.5), где $F_i(p, T, Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_g})$ – скорость образования i -й газовой компоненты в результате всех реакций. Уравнение (1.10) – уравнение состояния для смеси совершенных газов.

В рассматриваемых уравнениях u и v – осевая и радиальная компоненты скорости газа, а u_k и v_k – соответствующие компоненты скорости частиц k -й группы; H – полная удельная энтальпия газа:

$$H = \sum_{i=1}^{N_g} Y_i \left[h_i + \int C_{p_i}(T) dT \right] + \frac{u^2 + V^2}{2}, \quad (1.11)$$

где h_i и C_{p_i} – химический потенциал и теплоемкость газа при постоянном давлении для i -го сорта газа; H_k – полная удельная энтальпия частиц k -й группы

$$H_k = \int_0^{T_k} C(T) dT + L_m \xi_k + \frac{u_k^2 + V_k^2}{2}, \quad (1.12)$$

где C и L_m – соответственно теплоемкость и теплота плавления вещества частиц; R – универсальная газовая постоянная; W_i – молекулярный вес i -й компоненты газовой фазы; Pr и Sm – числа Прандтля и Шмидта.

Силowymi факторами, оказывающими воздействие на движение частиц конденсированного вещества в газовом потоке, являются следующие [31]: сила аэродинамического сопротивления, сила тяжести, сила Сэфмена, сила Магнуса, силы турбо- и термофореза. В струях, используемых для газотермического напыления, основной является сила аэродинамического сопротивления, обусловленная разницей скоростей газа и движущихся в нем частиц.

В этом случае выражения для скорости обмена импульсом \vec{f}_k и теплом q_i между газом и частицами k -й группы, отнесенные к единице массы частиц, могут быть представлены в виде:

$$\vec{f}_i = \frac{3}{8} C_{D_i} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{1}{R_i} |\vec{V} - \vec{V}_i| (\vec{V} - \vec{V}_i), \quad (1.13)$$

$$q_i = \frac{3}{2} \frac{\text{Nu}_i}{\text{Pr}} \frac{C_p \eta}{\rho_0 R_i^2} (T_i^* - T_i), \quad (1.14)$$

где C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; η – коэффициент вязкости газа; T_i^* – температура торможения газа на частицах i -й группы, C_{D_i} и Nu_i – коэффициент сопротивления и число Нуссельта для частиц i -й группы. Согласно работе [32],

$$C_{D_i} = \frac{24}{\text{Re}_i} \frac{(1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,69}) \left[1 + \exp \left(-\frac{0,427}{\text{M}_i^{4,6}} - \frac{3}{\text{Re}_i^{0,88}} \right) \right]}{\left\{ 1 + \frac{\text{M}_i}{\text{Re}_i} \left[3,82 + 1,28 \exp \left(-1,25 \frac{\text{Re}_i}{\mu_i} \right) \right] \right\}}, \quad (1.15)$$

$$\text{Nu}_i = \frac{\text{Nu}_i^0}{1 + 3,42 \frac{\text{M}_i}{\text{Re}_i} \frac{\text{Nu}_i^0}{\text{Pr}}}, \quad (1.16)$$

где

$$\text{Nu}_i^0 = 2 + 0,46 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}. \quad (1.17)$$

Здесь M_i и Re_i – числа Маха и Рейнольдса газа относительно частиц i -й группы

$$\text{M}_i = \frac{|\vec{V} - \vec{V}_i|}{a}, \quad (1.18)$$

$$\text{Re}_i = \frac{2R_i \rho |\vec{V} - \vec{V}_i|}{\mu}, \quad (1.19)$$

где a – скорость звука; Pr – число Прандтля; μ – динамическая вязкость

$$\text{Pr} = \frac{C_p \eta}{\lambda_T}, \quad (1.20)$$

а λ_T – коэффициент теплопроводности газа.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Методы активирования процессов поверхностной обработки элементов трибосопряжений	8
1.1. Активирование процесса газопламенного нанесения покрытий спутными газовыми потоками.....	8
1.1.1. Физическая и математическая модели процесса активирования спутным потоком	8
1.1.2. Разработка газопламенного оборудования для активированного напыления с использованием спутных потоков	35
1.2. Активирование процесса газопламенного нанесения покрытий наложением акустических колебаний	59
1.3. Активирование процесса электрохимического осаждения покрытий введением в электролит наноразмерной дисперсной фазы....	69
1.3.1. Физическая модель структурообразования материала композиционных электрохимических покрытий	69
1.3.2. Механизм осаждения композиционных покрытий из электролитов с дисперсной фазой.....	76
1.3.3. Особенности процесса кристаллизации композиционных электрохимических покрытий, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	84
1.4. Активирование процесса фрикционного плакирования гибким инструментом применением материалов-доноров с наноразмерными легирующими добавками	105
1.4.1. Сущность метода фрикционного плакирования гибким инструментом	105
1.4.2. Математическая модель формирования модифицирующего слоя покрытия при фрикционном плакировании гибким инструментом	107
1.5. Активирование трибомеханической обработки поверхностей трения введением в смазку наноразмерных алмазно-графитовых добавок	111
1.5.1. Повышение свойств пластичных смазочных материалов введением в их состав наноразмерных алмазно-графитовых добавок...	111
	449

1.5.2. Интенсификация процессов приработки с использованием наноразмерных алмазосодержащих компонентов	118
1.5.3. Модель фрикционного разрушения поверхности трения в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками....	130
Глава 2. Использование газопламенных покрытий для восстановления-упрочнения элементов трибосопряжений	139
2.1. Аналитическая оценка требуемого уровня свойств покрытий в узлах трения	139
2.1.1. Прочностная надежность газотермических покрытий	139
2.1.2. Выбор рациональной технологии нанесения покрытий	162
2.2. Особенности методов газопламенного напыления и свойства антифрикционных покрытий.....	166
2.3. Активированное газопламенное напыление антифрикционных металлических покрытий	173
2.3.1. Формирование покрытий из порошковых материалов на внутренних и наружных поверхностях	173
2.3.2. Технологии восстановления деталей узлов трения распылением проволок	189
2.4. Методы модифицирования напыленных покрытий	224
2.5. Технологии газопламенного напыления полимерных покрытий...	243
Глава 3. Повышение работоспособности трибосопряжений формированием покрытий, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	274
3.1. Электрохимическое осаждение хромовых покрытий, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками ...	274
3.1.1. Влияние наноразмерных алмазно-графитовых добавок на катодный процесс и характер осаждения электрохимических хромовых покрытий.....	274
3.1.2. Структура и свойства композиционных электрохимических хромовых покрытий, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	284
3.1.3. Разработка метода повышения антифрикционных свойств электрохимических покрытий низкотемпературной химической обработкой	305
3.1.4. Оптимизация процесса электрохимического осаждения антифрикционных композиционных покрытий на основе хрома, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками.....	308
3.1.5. Повышение эксплуатационных свойств элементов узлов трибосопряжений нанесением электрохимических хромовых покрытий, модифицированных наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	311

3.2. Разработка метода повышения работоспособности газотермических покрытий импрегнированием наноразмерными алмазно-графитовыми добавками и последующей термомеханической обработкой.....	318
3.2.1. Технологическая схема модифицирования газотермических покрытий импрегнированием наноразмерными алмазно-графитовыми добавками и последующей термомеханической обработкой.....	318
3.2.2. Структурно-фазовое состояние газотермических покрытий, модифицированных импрегнированием наноразмерными алмазно-графитовыми добавками и последующей термомеханической обработкой.....	323
3.2.3. Триботехнические свойства газотермических покрытий, модифицированных импрегнированием наноразмерными алмазно-графитовыми добавками и последующей термомеханической обработкой.....	334
3.2.4. Технологические рекомендации по модифицированию газотермических покрытий импрегнированием наноразмерными алмазно-графитовыми добавками и последующей термомеханической обработкой.....	338
Глава 4. Повышение ресурса трибосопряжений модифицированием поверхностных слоев с использованием наноразмерных алмазно-графитовых частиц.....	340
4.1. Формирование поверхностных слоев фрикционным плакированием гибким инструментом с модифицирующими добавками наноразмерных алмазно-графитовых частиц и компонентов твердой смазки.....	340
4.1.1. Напряженно-деформированное состояние и триботехнические свойства модифицированных поверхностных слоев, сформированных фрикционным плакированием гибким инструментом (ФПГИ).....	340
4.1.2. Применение композиционных покрытий, сформированных ФПГИ для улучшения эксплуатационных свойств трибосопряжений.....	350
4.2. Формирование поверхностных слоев трибомеханическим модифицированием приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками.....	353
4.2.1. Трибомеханическое модифицирование металлических материалов приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками.....	353
4.2.2. Трибомеханическое модифицирование металлополимерных композитов приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками.....	362
	451

4.2.3. Трибомеханическое модифицирование макрогетерогенных композитов приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	370
4.2.4. Трибомеханическое модифицирование газотермических покрытий приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	380
4.2.5. Оптимизация режимов трибомеханического модифицирования поверхности трения приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	390
4.2.6. Повышение работоспособности элементов трибосопряжений модифицированием поверхностей трения приработкой в среде смазки с наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	394
Заключение	402
Литература	410

Научное издание

Витязь Петр Александрович
Жорник Виктор Иванович
Белоцерковский Марат Артемович
Леванцевич Михаил Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ
АКТИВИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ
ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ**

Редактор *И. Л. Дмитриенко*
Художественный редактор *И. Т. Мохнач*
Технический редактор *О. А. Толстая*
Компьютерная верстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 18.10.2012. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 26,51. Уч.-изд. л. 22,6. Тираж 120 экз. Заказ 220.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом
«Беларуская навука».

ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.